VERS UNE IMAGE PLUS BELLE : LE LISSAGE OU ANTICRÉNELAGE

Le terme « aliasage » (*), si on utilise le néologisme issu de l'anglais « aliasing », traduit de manière générale une perte d'informations résultant de la numérisation et de l'échantillonnage d'un signal, et s'applique aussi bien dans les domaines du temps ou des couleurs, que dans l'espace.

Sur une image graphique, ce défaut de troncature a pour conséquences l'apparition de « marches d'escalier », ou crénelage, sur les contours des objets visualisés, la disparition d'objets de petite taille ou encore la distorsion des motifs des textures.

Prenons, par exemple, une palette graphique fonctionnant sur un moniteur 512×512 points, et traçons une droite au moyen du stylet de la tablette : nous visualiserons sur l'écran, non pas une droite régulière et linéaire, mais un ensemble de petites marches d'escalier, liées à l'insuffisance du nombre de pixels pour définir parfaitement la ligne. Le défaut est d'autant plus apparent que la ligne tracée s'approche de l'horizontale ou de la verticale.

Il peut donc s'avérer nécessaire de remédier à ce problème, par souci de précision et d'aisance visuelle. Nous donnerons ici un aperçu des techniques les plus couramment utilisées.

Les méthodes de lissage

Deux types de raisonnements visent à parer au défaut de crénelage :

1.— **Augmenter la résolution de l'écran jusqu'à ce que le défaut devienne invisible à l'œil :** il s'agit là sans doute de la meilleure méthode qui n'est toutefois pas à la portée de toutes les bourses. En effet, si l'on veut réduire par deux l'escalier apparaissant sur un moniteur 500×500 points, on doit acquérir un écran de 1 000×1 000 points.

2.— **Rechercher une méthode euristique :** les travaux dans ce sens ont commencé vers 1982, lorsque les Américains notamment ont pris conscience que l'augmentation inconsidérée de la définition n'était pas rentable. Il faut savoir qu'à cette époque les meilleurs moniteurs de CAO (1 280×1 024) coûtaient des fortunes ! On a ainsi abouti à des solutions donnant les moyens de corriger le crénelage dans une limite raisonnable, par rapport à la dépense engagée.

C'est le théorème de Shannon qui décrit les conditions dans lesquelles on sait récupérer des informations intermédiaires tronquées à partir de celles qui sont connues (**). Sans impliquer une méthodologie, cet énoncé nous indique que les données contenues dans l'image sont généralement suffisantes pour que l'on puisse faire des interpolation satisfaisantes.

On distingue trois techniques courantes pour réduire le crénelage : le suréchantillonnage, la table de couleurs et le filtrage. Mais il est bien entendu qu'il s'agit là de « trompe-l'œil », destinés à masquer la trop basse résolution, la seule solution réelle consistant à augmenter la définition.

Le suréchantillonnage

Le suréchantillonnage est l'une des premières techniques mises en application de façon systématique, sur les ordinateurs haut de gamme.

Elle consiste à définir dans le calculateur un écran fictif de résolution plus grande que celle du moniteur, et à traiter au cours de la numérisation plus de points que nécessaire (quatre fois plus pour un écran fictif deux fois plus important), en considérant chaque pixel comme un ensemble de sous-pixels fictifs (3×3 = 9 ou 4×4 = 16 sous-pixels),

(*) NDLR.- Nous ne prétendons pas être des spécialistes de la sémantique. Mais « aliasage » nous casse les oreilles, « aliasing » défrise notre chauvinisme, tout autant que les « anti- » qui les corrigent. « Anticrénelage », nous paraît bien compliqué. Qu'avez-vous donc, infographistes, contre « lissage » et « anticrénelage » qui disent bien ce qu'ils veulent dire ?

(*) NDLR.- Nous ne prétendons pas être des spécialistes de la sémantique. Mais « aliasage » nous casse les oreilles, « aliasing » défrise notre chauvinisme, tout autant que les « anti- » qui les corrigent. « Anticrénelage », nous paraît bien compliqué. Qu'avez-vous donc, infographistes, contre « lissage » et « crénelage » qui disent bien ce qu'ils veulent dire ?

Pour toutes précisions : réf. 130 du service-lecteurs (p. 91)

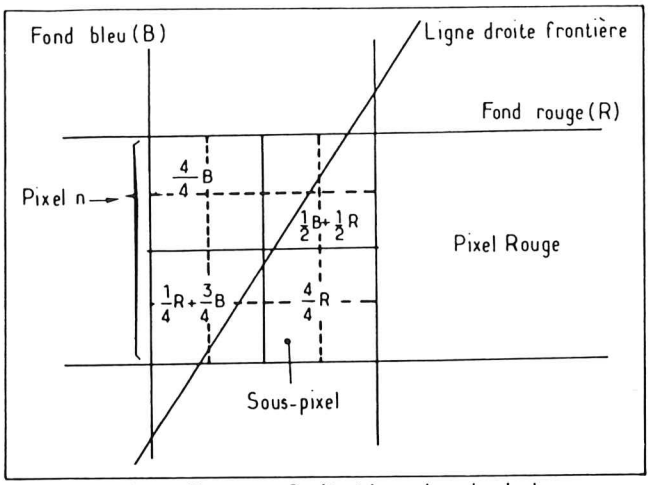


Fig. 1 - Le suréchantillonnage : C_n étant la couleur du pixel *n* :

$$C_n = \left(\frac{4}{4}B + \frac{4}{4}R + \frac{1}{2}B + \frac{1}{2}R + \frac{1}{4}R + \frac{3}{4}B\right)\frac{1}{4}$$

$$C_n = \frac{9}{16}\text{ Bleu} + \frac{7}{16}\text{ Rouge}$$

revient au calcul sur les surfaces bleu et rouge

S_B et S_R : $C_n = \frac{S_B}{S}B + \frac{S_R}{S}R$ (S : surface du pixel).

dont on fait la moyenne de la luminance et de la chrominance pour obtenir la couleur à lui affecter.

Cette dernière résulte d'une combinaison de couleurs, proportionnelle aux surfaces ou nombre de sous-pixels couverts par chacune des teintes. Prenons l'exemple d'une ligne diagonale délimitant un objet bleu d'un rouge (**fig. 1**). Nous observons des pixels bleus, d'autres rouges et certains situés à la frontière, dont une partie appartient au rouge, et une autre au bleu. C'est pour ces derniers que l'opération est intéressante puisqu'on calcule, pour chaque pixel, la moyenne des couleurs sur l'ensemble de ses sous-éléments, afin de lui attribuer une certaine teinte résultant du mélange proportionné de bleu et de rouge. Dans l'exemple de la figure 1, l'élément d'image *n* considéré se voit affecter la couleur C_n définie par :

C_n = (9/16) Bleu + (7/16) Rouge.

A l'issue de ces calculs, on rétrécit l'écran fictif pour ne garder qu'un point sur neuf (3 × 3 sous-pixels), ou sur seize pour les gros systèmes, afin de former l'image à visualiser. La teinte diluée de l'ensemble des points formant les contours des objets permet d'améliorer de façon notable la résolution apparente, l'œil intégrant bien cet ensemble, et agissant comme un filtre qui donne l'apparence de contours linéaires.

Bien entendu, la finesse de l'image est d'autant meilleure que l'on subdivise chacun des pixels en un nombre plus important de sous-éléments et, par suite, que l'on augmente à chaque fois la quantité de calculs à effectuer (de manière non négligeable).

Cette méthode donne d'excellents résultats puisqu'elle traite vraiment l'image point par point et non en fonction de l'environnement. On arrive ainsi à restituer un aspect naturel à des images de définition réelle 512 × 512 points, mais un écran de 1 000 × 1 000 points reste malgré tout plus précis. Cette méthode est bien adaptée à la synthèse d'images, surtout pour la simulation de vol. Des logiciels peuvent assurer les fonctions de calcul pour des applications de type CAO, que seuls des ordinateurs très performants et coûteux sont capables de réaliser en temps réel.

L'Institut de Technologie de New York, en particulier, a présenté de très belles images issues d'écrans 512 × 512 points et calculées sur 2 048 × 2 048. Quant à la société française TDI (Thomson Digital Image), elle possède, dans son département de simulation de vol, une machine qui dispose de processeurs spécialisés pour traiter le crénelage par suréchantillonnage. On comprend ici l'intérêt de ce procédé : sur un simulateur, un pilote doit se trouver psychologiquement dans un contexte s'approchant le plus possible de la réalité pour réagir correctement. Il ne doit pas être perturbé par le phénomène de crénelage, qui peut provoquer, par exemple, lors de la reconstitution d'un atterrissage, la déformation ou l'occultation de balisages sur une piste vue de loin. Le simulateur TDI comprend plusieurs moniteurs de 512 × 512 points qui fournissent une vue panoramique au pilote, et tous les calculs se font sur des images de 2 048 × 2 048 ou 4 096 × 4 096 points.

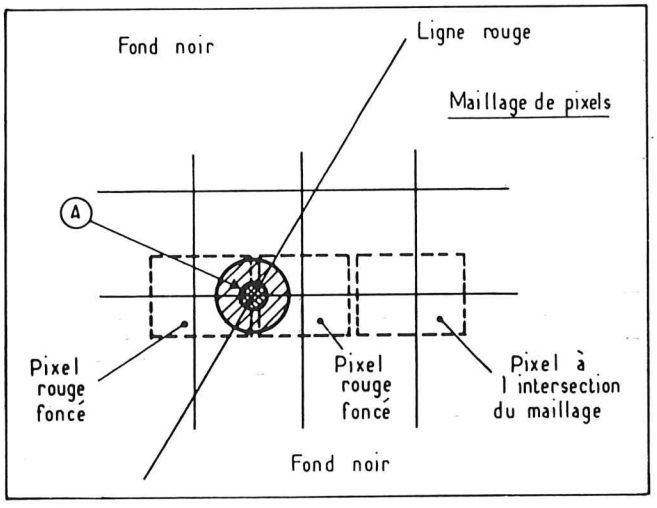
Technique de la « table de couleurs »

Le second procédé de lissage est apparu sur des machines de plus bas de gamme telles que Jupiter 7, qui fut une des premières à l'avoir intégré.

Le principe repose sur le dosage judicieux de deux couleurs (C1 et C2) plus ou moins complexes, sur deux pixels consécutifs, situés de part et d'autre d'un point intermédiaire que l'on veut de couleur C, de manière que C corresponde à la somme C1 + C2 (**fig. 2**).

Supposons que l'on trace une ligne rouge sur un fond noir. On charge alors une « table de couleurs » avec une série de teintes intermédiaires entre le rouge et le noir (dégradé dans ce cas). Si le calcul indique que cette ligne passe par un maillage intermédiaire au maillage de pixels de l'écran (chaque pixel étant intersection du maillage), alors on définit les pixels par excès et par défaut (droit et gauche) et on dose leur couleur en faisant appel à la table. Pour un point que l'on désire rouge au centre, on affecte aux deux éléments droit et gauche,

Fig. 2 - Procédé de la table de couleurs. Le point intermédiaire au maillage (A) sera rouge vif si les pixels de part et d'autre prennent la valeur rouge sombre.



un rouge sombre. Cette méthode consiste donc à créer des informations sur les positions entières du maillage, de manière que l'œil reconstitue les positions intermédiaires. Ce système impose un certain nombre de couleurs dès le départ. On a abandonné, en effet, l'idée de multiplier le nombre de pixels (suréchantillonnage) pour accroître le nombre de couleurs. Son coût est donc moins élevé, car si le nombre d'éléments sur l'écran croît comme le carré avec l'augmentation de définition, il augmente ici proportionnellement à la définition.

Pratiquement, on ajoute quelques bits supplémentaires aux composantes de chaque pixel, afin de le définir totalement (avec la couleur). Ainsi, le Jupiter 7 fonctionnait avec quatre décimales binaires supplémentaires, ce qui lui offrait $2^4 = 16$ possibilités de plus, ou seize niveaux de gris. Dans un jeu de 256 couleurs, il disposait de huit couleurs de base (les saturées primaires par exemple) et donc de seize nuances pour chacune d'elles, ou 128 couleurs préparées spécialement. Lorsqu'on lui demandait de lisser un trait (par exemple rouge), il opérait une conversion décimales binaires-couleurs automatiquement, et logeait dans une table les seize nuances de rouge. Il suffisait de choisir la couleur du fond et de déterminer les huit teintes de base.

Le principal défaut de ce dispositif, c'est qu'il dose la couleur a priori, par rapport à un fond donné. Si ce dernier change, l'erreur est complète et l'effet inverse apparaît : un crénelage évident se produit, car les teintes intermédiaires ressortent par rapport à la nouvelle couleur du fond au lieu de s'y « diluer ». Les choses se compliquent si l'image contient une série d'objets superposés de diverses couleurs. Dans ce cas, il faut tester la teinte du fond en chaque endroit, pour créer la table de couleurs correspondante, et doser par rapport à toutes les teintes, d'où une augmentation notable de la durée de traitement, et la limitation de ce procédé.

Cependant, au moment où Jupiter est sorti, il représentait une innovation évidente et offrait, sur fond uni, une résolution assez performante pour certaines applications industrielles particulières (liées à des travaux basés sur des dessins ou schémas). C'est pour la réalisation d'images audiovisuelles notamment, que la limitation intervient.

La technique du filtrage

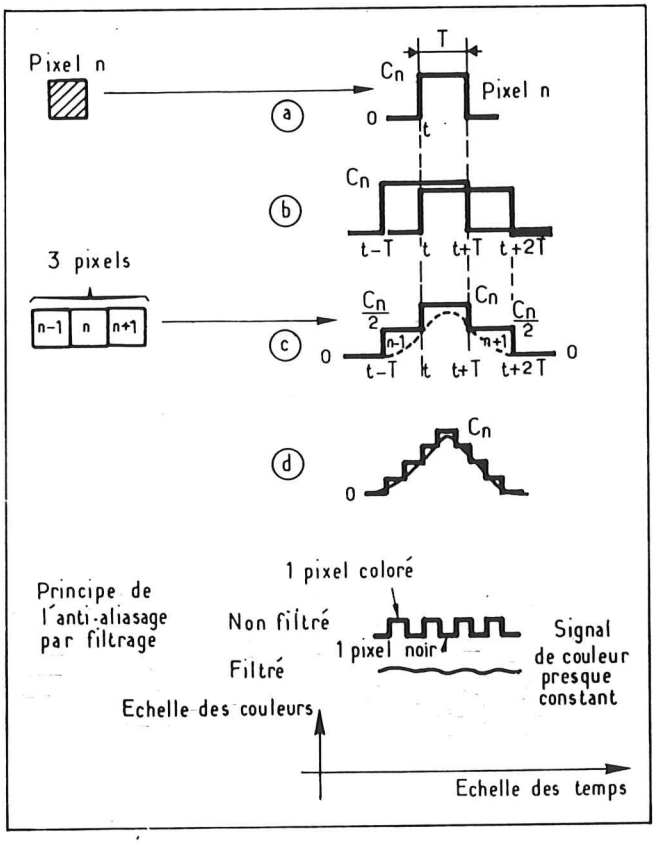
Le filtrage a été appelé aussi « technique de flou », parce qu'il provoque un adoucissement des contours, masquant visuellement le crénelage. L'œil s'attache effectivement beaucoup moins à la précision d'un point qu'à la cohérence d'un ensemble de points. Le processus repose sur une astuce temporelle, et s'apparente un peu au suréchantillonnage, dans la mesure où l'on analyse chaque pixel (mais il n'y a pas de sous-pixels) pour lui affecter une teinte pondérée par celle des pixels voisins. On utilise ici un décalage temporel, à droite et à gauche, pour créer un ensemble de pixels obéissant à une certaine loi de variation de couleur.

Concrètement, cela se passe de la manière suivante (**fig. 3**) : si un pixel *n* se voit affecter au temps *t* une couleur C_n, il recevra à *t* un signal d'une durée T (durée de passage du spot d'électrons sur un pixel), qui passera de 0 (a priori) à C_n (fig. 3a). Le processus de filtrage consiste alors à doubler la durée de ce signal (devenant 2T), et à le décaler pour le réécrire aux temps $t-T$ et t (fig. 3b). On fait la moyenne ensuite des trois signaux pour obtenir une information sur trois pixels consécutifs, d'amplitude respective $C_n/2$, C_n, $C_n/2$ (fig. 3c). On a donc fait baver ou déborder la couleur de l'élément *n* sur ceux qui l'entourent $n-1$ et $n+1$, et au lieu d'avoir (dans ce cas) un seul point coloré, on obtient une zone de plus en plus colorée.

On recommence l'opération avec le pixel suivant $n+1$ et ainsi de suite..., ce qui fait que chaque point a une influence sur ceux qui l'environnent. Ce procédé fonctionne avec n'importe quelle couleur de fond, puisqu'on aboutit à des recouvrements de teintes, ou mélanges, qui correspondent à l'interpolation recherchée.

Dans la réalité, le filtrage est plus complexe, car il opère sur un plus grand nombre de niveaux de couleur (et non pas deux comme dans l'exemple ci-dessus), pour donner une image subtilement adoucie (fig. 3d), comparable à celles que l'on obtient avec un appareil photo dont l'objectif a perdu de sa résolution (style Hamilton). Le lissage par filtrage donne des résultats satisfaisants pour la correction du crénelage (fig. 3e), avec tout de même une limitation en résolution (il fallait s'y attendre). Il reste toutefois relativement précis lorsqu'il est calculé sur un nombre suffisant de niveaux, et permet de distinguer trois lignes de coloration différente tracées côte à côte.

Fig. 3 - Technique du filtrage :
C_n : valeur de couleur du pixel *n* (luminance et chrominance).
T : durée de passage du spot sur un pixel. La « superposition » des pixels permet d'adoucir les transitions (a, b et c). En d, aspect temporel du signal de couleur pour filtrage utilisant un plus grand nombre de niveaux de couleurs.



Le principe est exploité dans des domaines relatifs à l'analyse d'images (images satellite notamment). Il est possible en effet, suivant l'algorithme de filtrage, de faire ressortir sur l'image certaines informations, en attribuant, aux points voisins de ceux qui présentent un intérêt, une certaine valeur ou pondération réglable, permettant d'atténuer ou de faire ressortir des détails, et ainsi de « filtrer » certains types d'événements. Dans le cas de l'anticrénelage, cette valeur ou pondération est constante quels que soient les points de l'écran. La société Artronic, en particulier, utilise la technique du filtrage dans certaines de ses palettes.

Logiciel ou câblage ?

Les trois techniques de correction du crénelage sont assurées par l'ordinateur, soit par logiciel (c'est le cas entre autres de la station Silver de De Grafe), soit par le biais d'un système câblé (station Grace). Bien entendu, c'est la rapidité de traitement de la machine, la quantité de calculs inhérents à la méthode choisie, et le type d'applications visées qui vont déterminer laquelle des solutions est préférable. Ainsi, lorsqu'on a besoin d'une grande rapidité de traitement (par exemple travail en temps réel), il est généralement nécessaire d'adopter la solution câblée, impliquant la présence d'un calculateur spécialisé dans la tâche d'anticrénelage.

N'oublions pas cependant que toutes les méthodes décrites ci-dessus sont destinées à améliorer une image trop grossière, en paliant les défauts de visualisation par effet optique ou masquage de ceux-ci. Fatalement, la véritable résolution demeurant inchangée, les informations reproduites ne sont pas toujours d'une rigueur absolue, cette dernière étant liée au mode de lissage adopté. De toute façon, quel que soit le réalisme obtenu, il se produit une perte par rapport à une image qui aurait été définie sur un écran de plus haute résolution.

Haute résolution

Comme nous l'avons dit au début de cet article, résoudre le crénelage en utilisant des écrans de haute définition est une solution coûteuse, bien qu'actuellement les prix tendent à baisser. Cependant, il existe des cas où elle se justifie. Dans certains domaines, une bonne visualisation importe relativement peu, car on cherche à concrétiser une tâche par un document fiable et précis. Dans d'autres secteurs, on privilégie davantage la finesse d'image parce que c'est une nécessité (conception rigoureuse par exemple sur console CAO).

Gixi, par exemple, fabrique ses systèmes en fonction de deux objectifs. Le premier tient compte avant tout de la qualité de reproduction, sur des copieurs numériques notamment. On trouve alors des calculateurs puissants qui conservent en mémoire des images de très haute résolution (de l'ordre de 16 000×16 000 ou 32 000×32 000 points) pour les recalculer en fonction du périphérique de sortie, et pour les faire apparaître sur un moniteur de visualisation en 540×512 points, sans correction de crénelage (car cela n'a pas grand intérêt). Les copieurs numériques spécialisés (Honeywell les fabrique) se composent d'un écran, type oscilloscope, de 4 096 points de côté, et d'un appareil photo équipé de trois filtres. On obtient, en sortie, un document sur diapositive Ektachrome défini par 4 096×4 096 points, c'est-à-dire quasiment parfait, sans aucune trace de créneaux. De même, on peut connecter, à l'ordinateur, une imprimante laser si l'on désire obtenir une reproduction sur papier. Le problème du crénelage visuel sur le moniteur est peu préoccupant ici, sachant que c'est l'image documentaire disponible en sortie qui est utile. Par ailleurs, lisser l'image visualisée n'avancerait à rien, pour la sortie sur imprimante laser, car celle-ci ne « digère » pas les techniques de lissage. Par contre, le fait de travailler dans la machine avec une grande résolution et de ramener cette résolution à celle de l'imprimante, permet d'avoir un document excellent.

Quant à l'image lissée par le procédé de suréchantillonnage, on pourrait théoriquement l'injecter dans une imprimante, sauf que la matrice de l'image calculée est fixée en fonction de la définition d'écran, et n'est pas forcément compatible avec la résolution du périphérique. De toute manière, les temps de calculs sont trop importants avec cette méthode, et hors de mesure avec les résultats que l'on désire obtenir.

Le second objectif tient compte de la précision d'image imposée lors du travail de CAO. Gixi supprime le problème du crénelage en adoptant des tubes haute résolution : 1 568×2 048 points couleur sur écran 19 pouces. Cette méthode plus onéreuse tend à se généraliser sur les gros matériels, et le développement rapide des tubes haute résolution, des processeurs de tracés et des processeurs de transformations ultra-rapides, semble pousser beaucoup de monde vers la haute définition, plaçant implicitement les systèmes de lissage en second plan, au niveau industriel. Ces derniers sont plutôt destinés à des machines moins puissantes et moins onéreuses, orientées vers la plupart des applications industrielles à budget (relativement) petit, artistiques (graphisme, etc.) et vidéo.

Grace : système intégrant le lissage

La machine « Grasys » (distribuée par Artech) est sans doute la seule dans ces prix (120 à 200 kFF tout compris, selon le micro-ordinateur adopté) à posséder un dispositif câblé, temps réel, aussi performant, pour gérer les opérations de lissage à l'écran. Ce système mis au point pendant de longues années par Luc Pham Van Cang, et présenté pour la première fois en juin 1985, a fait l'objet d'un brevet (pour le dispositif de lissage). Il fournit une image nette et précise sur un moniteur 768×576, en donnant l'impression d'avoir une résolution double. De par sa conception, il est particulièrement adapté au tracé de vecteur.

Jusqu'au début des années 1980, les ordinateurs ignoraient ce qu'était la « *transparence* », et « *dessinaient comme des aveugles* » ; aussi, Luc Pham Van Cang s'est lancé dans des recherches pour aboutir à la réalisation d'un processeur spécialisé de transparence. Celui-ci assume à lui tout seul cette fonction en temps réel. Ainsi, lorsqu'on lui demande d'écrire un point de couleur C, il va

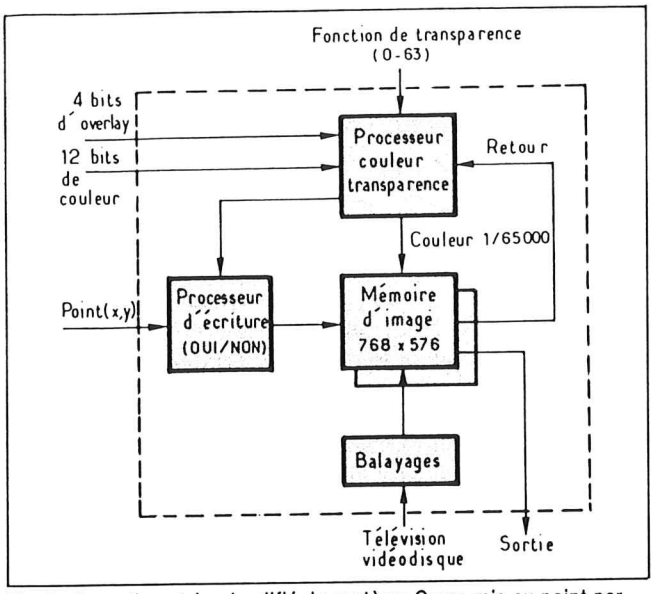


Fig. 4 - Synoptique très simplifié du système Grace mis au point par Luc Pham Van Cang.

d'abord voir à l'endroit où l'on veut l'écrire, quelle est la teinte C' déjà présente, mélange C avec C' en tenant compte d'un facteur de couvrance défini par l'utilisateur, puis va porter la couleur réultante sur l'écran. On a donc introduit une nouvelle dimension dans l'espace des couleurs de l'ordinateur. Il existe à présent, en plus des paramètres Rouge, Vert, Bleu, le facteur de couvrance (opacité, ou encore densité de couleur).

C'est après avoir fabriqué ce processeur que l'on s'est aperçu qu'il pouvait également résoudre le problème du crénelage, car, au lieu de créer une table de couleurs, il suffit de véhiculer l'information de dosage des teintes par le biais du facteur de couvrance, dosage assuré quelle que soit la couleur du fond. Le principe mis en œuvre s'apparente à la technique utilisée dans la station Jupiter, à la différence près que Grace joue sur la densité de la couleur à écrire, celle-ci étant donnée, et non plus sur la couleur elle-même. Par exemple, si on trace un trait vert sur fond noir, alors le processeur lisse en affichant un premier vecteur vert de densité maximale (entièrement opaque), puis des points intermédiaires du même vert mais de densité décroissante (par exemple 30 %, puis 10 %, etc.).

Le système se compose d'un PC, XT, AT ou compatible (selon les applications) qui vient se connecter à l'équipement de base qui est le processeur graphique Grasys, lequel va attaquer un moniteur couleur RVB. Le processeur est composé d'une mémoire d'images indépendante (capable de stocker une image TV définie par 768 × 576 points) dont le système de lecture est pilotable par un moniteur TV ou un vidéodisque (Genlock). Le dispositif d'écriture est commandé directement par un processeur de couleurs qui englobe, en particulier, les systèmes de transparence et de lissage. Quant au micro-ordinateur accompagnant le Grasys 1 (bas de gamme de Grace, seul commercialisé à ce jour), il assure, entre autres, les fonctions de processeur géométrique et processeur de transformations, grâce à un logiciel adéquat, et délivre, à sa sortie, tous les éléments utiles au processeur de coloriage (qui dose en particulier les couleurs pour le lissage de l'image). Reprenons cela plus en détail en jetant un coup d'œil au synoptique simplifié représenté en **figure 4.**

Le processeur d'écriture a pout but d'autoriser ou non l'écriture sur l'écran (ou en mémoire), en un point de composantes (*x, y*), sans que l'ordinateur ne soit au courant, et en fonction de certaines conditions : par exemple, l'interdiction préalable d'écrire dans des zones précises de l'image (il y a seize niveaux d'écriture, « overlays » ou plans d'image possibles). Une fonction détecte spécialement les différents plans d'image.

Chaque pixel (*x, y*) est défini en mémoire sur 16 bits, dont 4 bits par couleur primaire (soit 4 096 teintes simultanément à l'écran) et 4 bits d'overlay. Il peut donc renfermer environ 65 000 informations différentes, ce qui signifie que le processeur couleur affecte à chaque élément une couleur parmi 65 000 en ne considérant qu'un plan d'image.

Le déroulement des opérations est le suivant : on demande d'écrire une couleur C en un point (*x, y*) correspondant à une adresse donnée de la mémoire. Le processeur, grâce à la boucle de retour et à un système de relecture, lit la couleur déjà présente en ce point, et la combine avec C. C'est à présent le processeur d'écriture qui autorise ou non l'écriture de cette nouvelle valeur de couleur à la place de l'ancienne, en mémoire.

Le processeur couleur manipule la transparence, en tenant compte d'une fonction qu'on lui entre (fonction de transparence), qui va de 0 à 63. Selon celle-ci, il traite différemment la combinaison de la couleur C et du retour. Il dispose de seize niveaux d'opacité. Lorsqu'on est en mode « lissé », la fonction de transparence se charge de doser la couleur de l'écriture par rapport au fond, afin de former des contours non crénelés et des textures régulières. Par ailleurs, Grasys permet de créer d'autres types de transparences non naturelles, en modifiant la loi pour stipuler, par exemple, qu'un mélange de jaune et de vert donne du rouge, au lieu du jaune-vert, etc. Bref, la machine n'est plus aveugle. Elle regarde ce qu'il y a a priori sur l'écran, détecte les conditions qui l'autorisent ou non à dessiner (pour ne pas empiéter sur les zones interdites), puis dessine en tenant compte de l'image initiale et des paramètres que l'on a fixés.

Le processeur Grasys, entièrement câblé, a une rapidité de traitement dix fois plus importante que celle du circuit Nec fréquemment utilisé dans d'autres calculateurs (le Nec écrit plan par plan environ un pixel toutes les microsecondes). La palette possède d'intéressantes qualités pour un prix relativement faible, mais peu de développements y ont encore été apportés, à part cependant un logiciel de composition graphique, baptisé « Le Créateur », qui vient d'être commercialisé par la SGIP (Société de Gestion d'Informatique Publicis), qui rend la palette facilement utilisable.

Pour information, signalons encore que le modèle actuel sera suivi du Grasys 2 avec deux plans d'image et 65 000 couleurs, et du numéro 3 avec 16 millions de couleurs et huit plans d'image.

Patrick Fouque